

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.34: 62-50

4.4. ВЫБОР МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ДЛЯ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

DYNAMIC MODEL SELECTION FOR VECTOR CONTROL SYSTEMS OF AC ELECTRIC DRIVES

Лебедев Сергей Константинович, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, Тел.: +74932269709

Гнездов Николай Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. E-mail: gnezdov@drive.ispu.ru, Тел.: +74932269709

Колганов Алексей Руфимович, доктор техн. наук, профессор, зав. каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. E-mail: klgn@drive.ispu.ru, Тел.: +74932269709

Sergey K. Lebedev, Cand. Sc., Ivanovo State Power University named after V.I.Lenin, 153003, Rabfakovskaya street, 34, Ivanovo, Russia. E-mail: lebedev@drive.ispu.ru. Ph.: +74932269709

Nikolay E. Gnezdov, Cand. Sc., Ivanovo State Power University named after V.I.Lenin, 153003, Rabfakovskaya street, 34, Ivanovo, Russia. E-mail: gnezdov@drive.ispu.ru. Ph.: +74932269709

Alexey R. Kolganov, Doc. Sc., Ivanovo State Power University named after V.I.Lenin, 153003, Rabfakovskaya street, 34, Ivanovo, Russia. E-mail: klgn@drive.ispu.ru. Ph.: +74932269709

Аннотация: Рассматривается выбор формы и параметров распределения корней характеристического уравнения для структур систем управления электроприводов с параллельными контурами, регуляторами и наблюдателями состояния. Исследованы временные и частотные характеристики наиболее известных распределений. Предложены аналитические соотношения и методики практических расчетов параметров распределений по заданной полосе пропускания. Даны рекомендации по использованию распределения корней по Бесселю в системах управления электроприводами переменного тока.

Abstract: The choice of the form and parameters of root distribution of the characteristic equation for structures of electric drives control systems with parallel contours, state regulators and observers is considered. Time and frequency response of the most known distributions are investigated. Analytical relations and techniques of practical calculations of parameters of distributions for given value of pass band are offered. Recommendations about use of Besselian root distribution in control systems of ac electric drives are given.

Ключевые слова: электропривод; системы управления; наблюдатель состояния; характеристическое уравнение; среднегеометрический корень; стандартные распределения корней.

Key words: electric drive; control systems; state observer; characteristic equation; root mean square; standard root distribution.

ВВЕДЕНИЕ

В структурах векторного управления электроприводов переменного тока присутствуют как независимые (параллельные), так и подчиненные контуры регулирования, часто применяются наблюдатели (идентификаторы) параметров и переменных [1, 2, 3]. Важной задачей является выбор и согласование динамик всех элементов системы управления. Традиционно её решают на этапе синтеза приведением

распределения корней передаточной функции контура к одной из стандартных форм [4].

Наибольшее распространение в электроприводе получили следующие формы распределений корней:

- по Бесселю, отличающееся линейностью фазочастотной характеристики, что обеспечивает постоянство группового времени запаздывания и минимального искажения сигнала;

- по биному Ньютона, обеспечивающее монотонность временных характеристик для систем любого порядка;
- по Баттерворту, обладающее минимальным изменением амплитудной частотной характеристики в полосе пропускания и приемлемым затуханием в полосе задержания;
- по Баттерворту-Томсону, стремящееся к характеристикам, средним между распределениями Бесселя и Баттерворта.

При выборе формы распределения корней первоначально выбирают желаемый характер динамических процессов, а затем быстродействие, которое определяется во многом значением среднегеометрического корня ω_0 . В литературе рекомендуют выбирать значение среднегеометрического корня по нормированным переходным характеристикам фильтров стандартных форм (номограммам) [4]. Также есть рекомендации, учитывающие влияние упругих связей, параметрической чувствительности системы [5].

Однако этот вопрос изучен недостаточно: использование номограмм (графический метод) даёт погрешность, выбор ω_0 по заданной полосе пропускания не описан. В результате при стендовой отладке систем приходится корректировать параметры регуляторов, иногда в разы, чтобы достичь желаемых показателей.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ЗАДАННОМУ ВРЕМЕНИ РЕГУЛИРОВАНИЯ

При выборе ω_0 по нормированным переходным характеристикам исходной является, как правило, информация о времени регулирования t_p .

Процедура определения параметров стандартного распределения в этом случае включает:

- определение по требованиям к системе ЭП или ее элементам формы стандартного распределения, его порядка n , t_p и коридор отклонения переходной характеристики от установившегося значения Δh ;

- расчет $\tau_p = \omega_0 t_p$ по точке нормированной переходной характеристики, где она пересекает границы коридора Δh и больше не покидает его (рис. 1);
- определение значения среднегеометрического корня $\omega_0 = \tau_p / t_p$ по значению τ_p и заданному значению t_p ;
- расчет коэффициентов желаемого характеристического уравнения для синтеза регулятора подстановкой полученного значения ω_0 в нормированный полином стандартной формы.

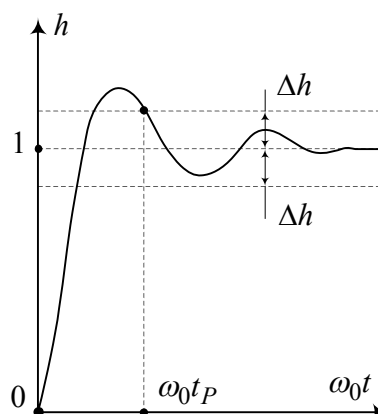


Рис. 1. Нормированная переходная характеристика

Для исключения погрешности, связанной с использованием номограмм, авторы составили в среде Mathcad ряд программ, позволяющих по заданным t_p и Δh получать значения ω_0 и коэффициентов характеристических полиномов Бесселя, Ньютона, Баттерворта и Баттерворта-Томсона до 5-го порядка включительно.

В табл. 1 для примера приведены результаты расчета для разных Δh при $n = 4$. Отметим, что повышение порядка полинома существенно усложняет численные расчеты, даже с учетом использования компьютерных средств.

Таблица 1.

Параметры нормированных переходных характеристик при $n = 4$

Параметры	Распределение корней			
	по Бесселю	по биному Ньютона	по Баттерворту	по Баттерворту-Томсону
δ , %	0,83	0	10,83	5,91
τ_p при $\Delta h = 5\%$, о.е.	3,58	3,36	6,85	5,56
τ_p при $\Delta h = 2\%$, о.е.	3,88	3,94	9,87	6,31
τ_p при $\Delta h = 1\%$, о.е.	4,03	4,36	10,43	8,49

Как и следовало ожидать, распределение Бесселя показывает наилучшие показатели по быстродействию при минимальном перерегулировании. Монотонные процессы обеспечивает бином Ньютона, но при одинаковом t_p требуются большие, чем в распределении Бесселя, значения ω_0 . В любом случае,

определение ω_0 по нормированным переходным характеристикам существенно зависит от заданной величины статической ошибки Δh , а в астатических системах, где $\Delta h = 0$, решение задачи отсутствует и сравнение различных форм распределения корней характеристических полиномов затруднено.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНДАРТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Более универсальным требованием к динамике электроприводов является обеспечение полосы пропускания f_{np} [8]. Кроме того и среднегеометрический корень имеет размерность частоты и находит свое отражение в частотных характеристиках динамических звеньев. Анализ ЛАЧХ и ЛФЧХ различных распределений выполнен при относительной частоте:

$$\omega' = \omega / \omega_0, \quad (1)$$

$$\omega_0 = \omega_{np} / \omega'_{np} \text{ и } \omega'_{np} = \min\{\omega'_{-3\text{дБ}}; \omega'_{-90^\circ}\}; \quad (2)$$

где $\omega'_{-3\text{дБ}}$, ω'_{-90° – относительные частоты пересечения границ полосы пропускания.

Характеристики показывают, что нормирование по уровню -3дБ соответствует полосе пропускания только для систем 2-го порядка, для систем 3-го порядка и выше полосу пропускания системы определяют по ЛФЧХ.

Далее для примера взята $f_{np} = 10 \text{ Гц}$.

Рассмотрено время группового запаздывания, постоянство которого в полосе пропускания характеризует минимальное искажение сигналов управления [4]:

$$t_z = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (3)$$

Для всех распределений получены характеристики нормированного времени группового запаздывания (например, рис 2). Для оценки равномерности характеристик выполнен расчёт относительного отклонения времени группового запаздывания t_z (табл. 2):

$$\Delta t_z = \left| \frac{t_z(0,01) - t_{z\text{max}}}{t_z(0,01)} \right| \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $t_z(0,01)$ – начальное значение времени группового запаздывания; $t_{z\text{max}}$ – максимальное отклонение.

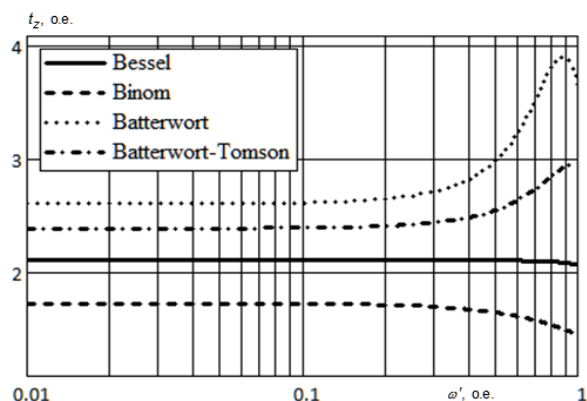


Рис. 2. Нормированное время группового запаздывания ($f_{np} = 10 \text{ Гц}$, $n = 4$)

Таблица 2.
Отклонение времени группового запаздывания

Распределение корней	Порядок полинома			
	2	3	4	5
по Бесселю	19,06	6,516	1,812	0,395
по биному Ньютона	29,17	20,56	15,85	12,91
по Баттерворту	20,69	37,13	49,58	48,19
по Баттерворту-Томсону	9,27	13,91	23,40	84,09

По значениям ω_0 , соответствующим заданной полосе пропускания, рассчитаны переходные характеристики для оценки динамических свойств (например, рис. 3). Параметры переходных характеристик для $n = 4$ приведены в табл. 3.

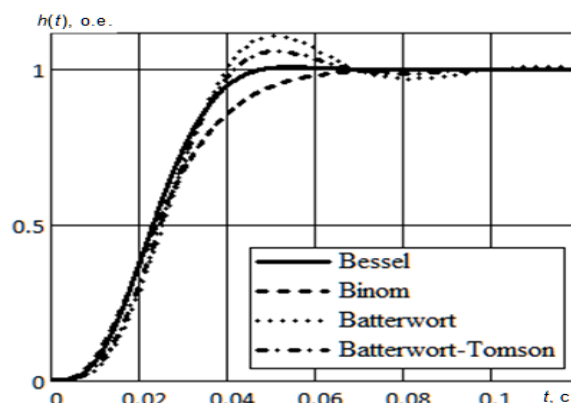


Рис. 3. Переходные характеристики, приведенные к полосе пропускания ($f_{np} = 10 \text{ Гц}$, $n = 4$)

Таблица 3.
 Параметры переходных характеристик,
 приведенных к полосе пропускания ($f_{np} = 10 \text{ Гц}$, $n = 4$)

Распределение корней	Параметры	
	δ , %	t_p при $\Delta h = 1\%$, с
по Бесселю	0,83	0,045
по биному Ньютона	0	0,066
по Баттерворту	11,08	0,095
по Баттерворту-Томсону	5,30	0,085

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования подтверждают предпочтительность выбора в качестве критерия настройки динамики электроприводов полосы пропускания, а не времени регулирования, которое, как критерий, имеет неопределенность с точки зрения ошибки регулирования.

Анализ результатов показывает, что максимальные результаты по монотонности и быстродействию при порядках систем от второго до пятого показывает распределение Бесселя. В случае жестких требований к отсутствию перерегулирования при синтезе систем

управления следует выбирать распределение по биному Ньютона, оно незначительно проигрывает Бесселю только в быстродействии.

Что же касается характеристики группового времени запаздывания, максимальные результаты по ширине зоны постоянства в полосе пропускания и минимальное относительное отклонение при рассмотренных порядках систем имеет распределение Бесселя.

Таким образом, настройка динамики электроприводов на распределение корней характеристического уравнения замкнутой системы по Бесселю не только дает преимущества перед другими распределениями по быстродействию и монотонности, но и обладает уникальными свойствами, обеспечивающими минимальные искажения при реализации сигналов управления.

В табл. 4 представлены абсолютные характеристические полиномы Бесселя, приведенные к заданной полосе пропускания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).

Таблица 4.

Полиномы Бесселя, приведенные к полосе пропускания

n	ω_0	Характеристические полиномы Бесселя
2	ω_{np}	$s^2 + 2,203\omega_0 s + 1,619\omega_0^2$
3	$\omega_{np} / 0,9$	$s^3 + 3,417\omega_0 s^2 + 4,867\omega_0^2 s + 2,771\omega_0^3$
4	$\omega_{np} / 0,74$	$s^4 + 4,730\omega_0 s^3 + 10,069\omega_0^2 s^2 + 11,114\omega_0^3 s + 5,258\omega_0^4$
5	$\omega_{np} / 0,65$	$s^5 + 6,179\omega_0 s^4 + 17,82\omega_0^2 s^3 + 29,36\omega_0^3 s^2 + 21,21\omega_0^4 s + 11,21\omega_0^5$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 320 с.
2. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.
3. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
4. Мошиц Г. Проектирование активных фильтров / Х. Мошиц, П. Хорн. – М: Мир, 1984. – 320 с.

5. Борцов, Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями. 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.
6. Лебедев, С.К. Выбор параметров стандартных распределений при синтезе электроприводов / С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов, А.А. Коротков // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2008. – №3. – С. 14-16
7. Глазунов, В.Ф. Многосвязные электромехатронные системы с нежесткой механикой / В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 224 с.
8. ГОСТ 27803-91. Электроприводы регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования. – Введ. 1992-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1991.